



TITLE:

Historical investigations into the development of classical statistical mechanics(Abstract_要旨)

AUTHOR(S):

Inaba, Hajime

CITATION:

Inaba, Hajime. Historical investigations into the development of classical statistical mechanics. 京都大学, 2015, 博士(文学)

ISSUE DATE:

2015-03-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k18713>

RIGHT:

学位規則第9条第2項により要約公開

京都大学	博士（ 文学 ）	氏名	稲葉 肇
論文題目	Historical investigations into the development of classical statistical mechanics（古典統計力学の発展の歴史的探究）		
<p>（論文内容の要旨）</p> <p>本論文は1871年から1911年にかけての古典統計力学の歴史的展開を，アンサンブル理論の発展という視点から論じる．アンサンブル理論は，アメリカの理論物理学者・数学者ジョサイア・ウィラード・ギブス（Josiah Willard Gibbs, 1839–1903）により整備され，現代の統計力学の基盤となったとされる理論である．これまで，統計力学の発展を扱った科学史の記述では，マクスウェル（James Clerk Maxwell, 1831–1879）あるいはボルツマン（Ludwig Boltzmann, 1844–1906）の気体運動論が第一の対象とされてきた．これは，気体運動論が物理学に統計的手法が導入された最初の事例であり，また哲学的に見ても，理論の還元や，原子の存在をめぐる論争といった観点から重要な事例を提供できたからである．そうした研究によって，統計力学に関する数々の重要な歴史的結果が明らかにされてきたことは確かである．ところが，気体運動論は，気体分子どうしの衝突や，それらの間に働く分子間力を明示的に考察する必要があり，20世紀初頭までは希薄気体しか満足に扱えなかった．対してアンサンブル理論は，与えられた条件のもとで可能なすべての状態（あるいは系の集団）を考え，この集合の中でさまざまな物理量の平均値を計算することで求める結果を導くため，希薄気体にとどまらない，広い範囲にわたる適用可能性を持つ．実際，実在気体，固体，相転移など，物理学における多くの問題に対してアンサンブル理論は足掛かりを提供してきた．しかし，ギブスのアンサンブル理論に関しては，ギブスの著作が難解であると思われてきたこともあり，十分な歴史的考察がなされてこなかった．本論では，ギブスの主著『統計力学の基礎的諸原理』（以下『諸原理』）の分析を中心とし，統計力学の歴史に対してアンサンブル理論の発展という視点からのアプローチを試みる．それにより，ギブスのアンサンブル理論を歴史的文脈の中に位置付け，統計力学の歴史に対して運動論の発展とは異なる角度からの光を当てる．</p> <p>第1章は，アンサンブル概念の起源と，アンサンブル理論の発展を扱う．最初にアンサンブル概念を導入したのはボルツマンである．彼は1871年，マクスウェル=ボルツマン分布を導出する際に，運動論的な考察よりも簡単かつ一般的な手法としてアンサンブルを導入し，そのヤコビの最終乗式との関係を論じたのだった．しかし，実際に分布を導出する際には系の集団としてのアンサンブルを，多原子分子の集団として再解釈したことに注意すべきである．1879年，マクスウェルは系の集団としてのアンサンブルを導入し，マクスウェル=ボルツマン分布の導出を行い，等分配則を証明した．彼もまた，気体のみならず，原理的には液体や固体にも適用できるという意味でのアンサンブル理論の一般性を強調している．加えて，アンサンブルの使用を力学的に正当化するための，いわゆるエルゴード性への言及も見られる．1881年，ボルツマンはこのマクスウェルの研究を詳しく検討した．1898年に出版された『気体論講義』</p>			

第2部では、ボルツマンはアンサンブルを用いていくつか一般的な議論を行った。なお、ボルツマンとマクスウェルが導入したのは、今日で言うミクロカノニカル・アンサンブルに対応する。1902年から1904年にかけての「統計三部作」においてアインシュタインは、ギブスと独立に、今日のミクロカノニカル・アンサンブルとカノニカル・アンサンブルにあたるものを導入することで統計力学の理論体系を展開し、熱力学第二法則の導出を試みた。彼のアンサンブルの導入法は物理的な状況設定を基にしており、ほぼ同時期に書かれた『諸原理』におけるギブスの数学的な条件による議論とは対照的である。

第2章は、熱力学的アナロジーの発展を扱う。熱力学的アナロジーの起源は1884年に発表されたヘルムホルツ（Hermann von Helmholtz, 1821–1894）の単循環系の研究に遡ることができる。単循環系とは、「速く変化する座標」（今日で言う循環座標）を一つだけ持つ力学的な系である。「速く変化する座標」の変化は熱運動に対応し、遅く変化する座標の変化は仕事に対応する。彼は単循環系を用いて、熱力学で成立する関係式と同じ形をした力学的な関係式を確立し、また複数の単循環系を組み合わせることによって、断熱操作や等温操作に類似した操作を力学的に表現した。しかし、ヘルムホルツによれば、これらは熱力学の法則の力学的な導出ではなく、形式的な対応関係に過ぎない。熱運動は、力学的に取り扱うにはあまりにも複雑だからである。とはいえ、彼は、こうしたアナロジーに、将来よりよい理論に至るための発見法としての価値を認めたのだった。同年にボルツマンはヘルムホルツの研究を、「エルゴード」（ミクロカノニカル・アンサンブル）と「ホローデ」（カノニカル・アンサンブル）を導入することで拡張した。これらは、分布が定常という条件を満たすように定義されたアンサンブルである。ボルツマンは単一系とアンサンブルとの関係について、いわゆるエルゴード性にも言及している。ボルツマンの研究はアンサンブル理論と熱力学的アナロジーを結合させていると言えるが、関係式のアナロジーしか展開していない。その意味で、このアンサンブル理論と熱力学的アナロジーの統合は不完全である。また1887年以降は、彼は熱力学的アナロジーに言及していない。

第3章では、ギブスのアンサンブル理論を、アンサンブル理論の系譜と、熱力学的アナロジーの系譜のひとつの統合として位置付ける。ギブスは1884年から統計力学についての発言を開始する。遺された講義録からは、彼は遅くとも1895年までには、自身の統計力学理論の基本的な構想を完成させていたことが分かる。1902年の『諸原理』では、アンサンブルが定義された後、統計的平衡条件が確立される。この条件を満たすような分布としてカノニカル・アンサンブル、ミクロカノニカル・アンサンブル、グランドカノニカル・アンサンブルが導入される。単一系とアンサンブルの関係については、ギブスは、系の自由度が十分に大きければ、そのエネルギーのアンサンブル平均からのずれは観測できず、一定であるとみなせる、という統計的な議論を与えた。これらはアンサンブル理論の系譜に連なるものとしての特徴である。他方でギブスは、アンサンブルを用いて、熱力学において成立する関係式と形式的に類似した関係式を導き、それによって熱力学量に対応する統計力学的な量を見出した。また彼は、熱力学における等温操作と断熱操作に対応した操作を論じた。これらの対応関係は顕著ではあるが、熱力学の法則の統計力学による導出ではなく、両者の間のアナロ

ジーに過ぎない。ここで展開した統計力学においては、放射熱や化学電池など、自然界で生じる現象に比べればあまりにも単純な系しか扱っておらず、またその制約を受け容れたとしても、多原子分子の比熱に関しては理論値と観測値の間に不一致が存在したからである。それでも、アナロジーは将来の理論のための発見法としての役割が期待できる。こうしたギブスの考察はヘルムホルツに始まる熱力学的アナロジーの系譜に属する特徴を持つ。それゆえ、ギブスの理論は、二つの系譜の統合として位置付けられるのである。

第4章は、『諸原理』以後のアンサンブル理論の展開を追い、それが確立した地位を持つまでの経過を追う。1900年代には、ギブスの『諸原理』は何度も書評され、その内容が検討された。プランク (Max Planck, 1858–1947) やツェルメロ (Ernst Zermelo, 1871–1953) による評価に代表されるように、そこでは『諸原理』におけるエントロピーの統計力学的な定義が問題となっており、ボルツマンによる定義が好まれることも多かった。対してオランダのローレンツ (Hendrik Antoon Lorentz, 1853–1928) とオルンシュタイン (Leonard Salomon Ornstein, 1880–1941) はギブスの理論を採用し、その基礎を洗練させ、アンサンブル理論の持つ一般性を強調した。しかし彼らは、ギブスが注意していた熱力学的アナロジーは無視ないし放棄し、アンサンブル理論から導かれるさまざまな関係を熱力学的なそれと同一視するに至った。また、彼らはアンサンブル理論の実在気体、黒体放射、浸透圧など、より具体的な問題への適用を進めた。単一系とアンサンブルの関係については、彼らはギブスを引き継いで統計的な正当化を与えた。パウル・ヘルツ (Paul Hertz, 1881–1940) は時間アンサンブル、線アンサンブル、エネルギー表面アンサンブルを考え、ギブスの意味でのアンサンブルを時間アンサンブルへと還元することで力学的な正当化を与えようとした。ヘルツの試みはオルンシュタインにも影響を与えた。1911年、力学的な正当化の路線はエーレンフェスト夫妻 (Paul Ehrenfest, 1880–1933; Tatiana Ehrenfest, 1876–1964) に引き継がれた。夫妻は、エルゴード仮説が正しければ時間平均とアンサンブル平均が等しくなることを示してアンサンブル理論の力学的基礎を与え (ただしエルゴード仮説は非常に強い仮定であり、実際には満たされないだろうから、若干弱い擬エルゴード仮説で十分ではないか、と示唆してもいる)、また、アンサンブル理論の道具立てを用いて、ボルツマンの H 定理の解釈を精密化した。夫妻はギブスの理論を、曖昧な概念を明晰にしていく「公理化」の手段として紹介しているが、エントロピーの統計力学的定義や、エントロピー増大の法則の統計力学的な証明に関しては、ギブスの理論に対して否定的な態度を取った。しかし、第1回ソルヴェイ会議 (1911年) においてローレンツは、ギブスの理論を使用した。ローレンツは以前と同様に統計的な正当化に訴え、カノニカル・アンサンブルを中心的な道具として黒体放射を論じた。またその発言から、ギブスの理論がその頃までに安定した地位を持つようになったことが分かる。

以上から、三つの帰結が導かれる。ひとつは、アンサンブル理論が、気体のみならず、(平衡状態にある) 液体や固体にも適用できる一般的な理論としての期待をかけられていたことである。気体運動論は、気体分子どうしの衝突や、分子間力を明示的に考慮する必要があるため、実際には希薄気体しか十分に扱うことは出来なかった。

対してアンサンブル理論は、平衡状態にあるならば、原理的にはどのような物質に対しても適用できたのである。このことは、初期のボルツマン、マクスウェルから、ギブスを経て、ローレンツ、オルンシュタインに至るまで、一貫して強調されており、それゆえ彼らにとって非常に魅力的な特徴だったことがうかがえる。本論で扱った古典論の範囲においては、アンサンブル理論が具体的な物理現象に適用された事例は多くない。しかしそれは、来るべき量子統計力学の時代においても有効であり続けた。このことは、ギブス理論を採用したランダウ=リフシッツ (Lev Landau, 1908–1968;

Evgeny Lifshitz, 1915–1985) の『理論物理学教程』や、トールマン (Richard C. Tolman, 1881–1948) の『統計力学の諸原理』などに明らかである。ギブスに代表されるアンサンブル理論は、後の量子統計力学の発展にとってのインフラストラクチャーを提供したと言える。

アンサンブル概念を採用するための正当化として、これまで科学史の記述で強調されてきた力学的なエルゴード仮説の他に、統計的な正当化とも言うべき路線が追究されていたことも重要である。その萌芽はボルツマンに認めることも出来るが、本格的にはギブスに始まり、ローレンツ、そしてオルンシュタインに受け継がれた。力学的な正当化に関しては、エルゴード仮説が一般に成立することは不可能であることが証明された (1913年) 後、最終的に1930年代初頭のバーコフ (George D. Birkhoff, 1884–1944) とフォン・ノイマン (John von Neumann, 1903–1957) による、擬エルゴード仮説に基づいたエルゴード定理に結実する。これに対してトールマンは1938年、統計的な正当化の見地から厳しい批判を加えた。エルゴード定理は、物理理論としてはあまりにも長い時間を必要とするし、また、異常な初期状態の可能性を排除することは出来ない。むしろ、単一系の持つさまざまな性質は、系の自由度が十分に大きければ、アンサンブルにおける平均値から大きく外れることはほとんどないのであり、それゆえ単一系の状態は対応するアンサンブルからランダムに取られたものとみなせる (アприオリ等確率の原理)、と言うのである。本論では、アンサンブル理論に対する統計的な正当化の路線を強調しようとした。

ギブスが強調した熱力学的アナロジーに対する、物理学者の態度も興味深い。アインシュタイン、ローレンツ、オルンシュタインら、20世紀初頭にアンサンブル理論に関わった物理学者たちは熱力学的アナロジーを無視ないし放棄し、統計力学から導かれたさまざまな帰結を、熱力学的なそれと同一視するに至った。この理由を明らかにする確たる文献的証拠はないが、いくつかの推測は可能である。具体的な物理的現象を理論から説明しようとしたとき、アナロジーとしての理論の特徴付けは妨げにしかならなかっただろう。ボルツマンが『気体論講義』において熱力学的アナロジーに言及しなかったからかもしれない。そもそも、彼らはそのような方法論的・哲学的テーマに関心を持たなかったのかもしれない。いずれにせよ、20世紀初頭における熱力学的アナロジーに対する態度の変化は、物理学者の間の世代差を示しているように思われる。

ただし、本論では統計力学の原理的な側面に焦点を当てたため、科学理論としての統計力学に期待される、具体的な物理的現象の説明との関連は十分に扱えなかった。例えば、19世紀後半においては、統計力学と化学的現象との関係が強かったことが知

られているが、これに関する探究を進めることは本論では出来なかった。上でエルゴード仮説に対置した、統計的な正当化の歴史的展開についても、より詳細な研究を進めるべきであろう。また、古典的なアンサンブル理論が量子統計力学のインフラストラクチャーを提供したと言うのであれば、そのインフラストラクチャーを用いて実際にどのように理論的展開がなされたのかという課題も残る。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、古典力学や電磁気学などとともに古典物理学の基本分野である古典統計力学の誕生過程を、その中心となるアンサンブル理論に焦点を定めて考察したものである。古典統計力学は、その重要性にも拘わらず、物理学の歴史においては他の分野と比較して研究の蓄積が少なく、その成立過程は十分検討されてきたとはいえない。とくにアンサンブル理論については、古典統計力学の理論的核心であるにもかかわらず、その難解さのためもあって歴史的考察がこれまでほとんどなされてこなかった。

古典統計力学は、その名称の通り古典力学に統計的手法を適用し、ミクロな粒子の振舞からマクロな世界における物理的性質を説明する試みであり、その基本概念がアンサンブルである。アンサンブルとは、圧力や体積、温度といったマクロな物理量が同じであっても、ミクロな物理量が異なる状態の集まりを意味し、それらに関して統計的処理を行うことによってマクロな物理量を導出するのが統計力学である。従来の統計力学史研究では、その前史ともなる19世紀後半の気体分子運動論へ関心が集中し、本論文の主題であるアンサンブル理論に関する研究は非常に少なかった。本論文は、アンサンブル理論が定式化されたことで知られる、米国の物理学者ジョサイア・ウィラード・ギブスの『統計力学の基礎的諸原理』(1902年刊行)を考察の中心に据え、古典統計力学の発展過程を第一次文献の精緻な読解に基づき跡づけている。

本論文の意義は、以下に挙げるような点に見いだすことができよう。

第一に、従来ギブスから語られるのが通例だったアンサンブル理論の歴史について、19世紀後半とりわけボルツマンとマクスウェルの気体分子運動論の中にその起源を見いだし、ギブスまでの系譜を明らかにした点である。ギブスの理論的革新は、ボルツマンらの理論が気体分子運動論という力学的描像に密接に結び付いていたのに対し、一般的かつ抽象的な描像においてアンサンブル概念を明瞭に定義したことにあつたことが明らかにされている。

第二に、統計力学と熱力学の関係において歴史的転換があつたことを指摘した点がある。現代の物理学では、統計力学によって熱力学の関係式が導出されると考えられているが、ギブスの場合はそうではなかった。彼は、統計力学的手法によって古典力学から熱力学の関係式と同形の関係式を導出しつつも、統計力学的考察から熱力学の関係式が導出されたとは考えず、両者の間にアナロジーを認めるだけなのである。このアナロジーの起源は、19世紀後半にヘルムホルツやボルツマンによってなされていた力学的な系と熱力学的な系の間に形式的な対応関係を探る試みに見いだされる。ギブスは彼らの熱力学的アナロジーのアプローチを引き継ぎ、アンサンブル理論と統合したのである。

第三に、ギブスのアンサンブル理論受容と古典統計力学成立の過程を解明した点が挙げられる。アンサンブル理論はその抽象性のゆえに、当初は必ずしも高い評価が与えられていなかったが、気体のみならず液体や固体に対しても適用可能であり、その応用範囲の広さによって有用性が認められていったことが明らかにされている。とくに1912年にローレンツがアンサンブル理論を用いて黒体輻射を論じたこ

とが取り上げられ、この時点においてギブスの理論が安定した地位を獲得していたことが指摘されている。

これまで古典統計力学成立期の状況についてはほとんど解明されておらず、本論文は古典統計力学発展史を開拓した研究と言っても過言ではないと考えられる。もちろん本論文にも望まれる点がないわけではない。アンサンブル概念を最初に明確な形で用いたのはギブスだったのにもかかわらず、彼に先立つボルツマンや、彼の影響を受けていないアインシュタインらがアンサンブルと同等の概念を用いていたような誤解を与える恐れのある記述がみられ、より慎重な叙述が求められる。

しかしこの点は論者も自覚しており、今後の研鑽の過程で克服されていくものと考えられ、本論文の価値を大きく損なうものではないと考えられる。

以上、審査したところにより、本論文は博士（文学）の学位論文として価値あるものと認められる。

なお、2015年1月27日、調査委員3名が論文内容とそれに関連した事柄について口頭試問を行った結果、合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、当分の間、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。